

¹А.А. Крючин, ¹В.В. Петров, ¹В.М. Рубіш, ¹М.Л. Трунов,
²С.О. Костюкевич, ²К.В. Костюкевич

ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ РЕЛЬЄФІВ НА ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Проведено аналіз базових технологій формування мікрорельєфних структур на поверхні плівок халькогенідних напівпровідників. Визначені переваги створення мікрорельєфних структур на поверхні таких плівок методом прямого лазерного запису. Представлено результати експериментальних досліджень та визначено перспективні технології створення дифракційних оптичних елементів у тонких плівках халькогенідних напівпровідників.

Ключові слова: поверхневий рельєф, халькогенідні напівпровідники, хімічне травлення, прямий лазерний запис.

1. ВСТУП

Планарні мікрооптичні елементи можуть знайти широке застосування в оптичних системах [1]. Прямий лазерний запис (ПЛЗ) є ефективним методом формування плоских оптичних елементів, бінарних та напівтонових структур для трансформації лазерного випромінювання. ПЛЗ має значно більші застосування, ніж тільки запис даних на оптичні диски та дозволяє виготовляти широкий спектр дифракційних оптичних елементів (ДОЕ). Для покращення характеристик оптичних систем спостереження, можливості отримання аерофотознімків з високою роздільною здатністю потрібні плоскі світлофокусуєчі елементи. Усунення аберацій для отримання чітких зображень за допомогою традиційного об'єктива з високою роздільною здатністю від систем відеоспостереження зазвичай досягається за рахунок застосування великої кількості оптичних елементів. Такий підхід призводить до значного збільшення ваги системи спостереження. Цю проблему можна вирішити шляхом створення невеликих і легких систем формування зображень з використанням дифракційних оптичних елементів. Плоскі дифракційні оптичні елементи не тільки покращують роботу стандартних лінзових та дзеркально-лінзових систем, але також можуть бути використані для створення унікальних приладів для офтальмології. Для створення штучного ока необхідно вирішити ряд складних завдань, у тому числі виробництво гнучких плоских суперлінз [2,3]. Технологія ПЛЗ різних мікро- оптичних елементів вимагає створення точних систем обертання підкладки з фоточутливим шаром, позиціонування головки запису за заданою програмою, а також налаштування та контролю потужності лазерного випромінювання, яким здійснюється запис оптичних елементів [3-5]. Метод прямого лазерного запису дифракційних оптичних елементів має суттєві переваги над іншими технологіями формування дифракційних оптичних елементів завдяки точному контролю параметрів процесу формування елементів, гнучкості процесу виготовлення мікрорельєфних оптичних елементів, можливості створення дифракційних оптичних елементів на підкладках з різних матеріалів. Для створення дифракційних оптичних елементів можуть бути використані технології запису сфокусованим лазерним випромінюванням бінарних, напівтонових та багаторівневих мікрорельєфних структур. Використання сфокусованого лазерного пучка для запису ДОЕ висуває жорсткі вимоги до точності фокусування та рівня флуктуацій лазерного випромінювання [3,6-8].

Прямий лазерний запис дозволяє здійснювати виготовлення дифракційних оптичних елементів з довільним профілем рельєфу, який необхідний для створення складних 3D структур. Прямий лазерний запис дифракційних оптичних елементів з мікрорельєфною структурою може здійснюватися на шарах фоторезистів на модернізованих станціях

© А.А. Крючин, В.В. Петров, В.М. Рубіш, М.Л. Трунов,
С.О. Костюкевич, К.В. Костюкевич, 2022

лазерного запису дисків-оригіналів, які використовуються у виготовленні компакт-дисків [9]. Керуючи переміщенням лазерного променя і потужністю лазерного випромінювання запису, можна локально змінювати в зоні освітлення властивості фоторезисту. Промислові станції лазерного запису були розроблені для запису інформації на диски-оригінали із шаром позитивного фоторезисту. Вони характеризуються обертанням підкладки із заданою, постійною лінійною швидкістю та точним радіальним переміщенням головки запису. Модернізація стандартних станцій лазерного запису необхідна для реалізації процесу запису доріжок визначеної ширини із змінним кроком та реалізації багаторівневого експонування шару фоторезисту при формуванні багаторівневих дифракційних оптичних елементів. Попередні дослідження показали, що ПЛЗ на фоторезистах можна використовувати для швидкого виготовлення масивів мікрооптичних структур (до трьох разів швидше, ніж у системі електронно-променевої літографії) [6]. Метод ПЛЗ дифракційних оптичних елементів має значні переваги над іншими технологіями виробництва фазових оптичних елементів, забезпечує точний контроль параметрів процесу, гнучкість у виготовленні рельєфних мікрооптичних елементів за допомогою сканування та проявлення, а також можливість виготовляти дифракційні оптичні елементи з довільними профілями рельєфу поверхні [5-7]. Вимоги до точності виготовлення мікрорельєфних елементів і дифракційної оптики за останні роки значно зросли. Відбувається перехід до субмікронного та нанодіапазону розмірів оптичних елементів. Метод прямого лазерного запису дозволяє створювати мікрооптичні елементи різних типів, наприклад, напівтонові мікрорельєфні структури, бінарні та багаторівневі мікрорельєфні структури [8,10]. Технології дифракційної оптики досить близькі до технологій мікроелектроніки і багато технологічних процесів та обладнання можуть використовуватися для виготовлення дифракційних елементів. Для створення нових типів ДОО виникла потреба у створенні спеціалізованого високоточного та високопродуктивного обладнання.

Слід відзначити, що мікрорельєфні дифракційні оптичні елементи мають складну тривимірну форму, розраховану методами комп'ютерного проектування. Крім методів прямого лазерного запису для формування мікро-/нанорозмірних структур на поверхні халькогенідних напівпровідників, застосовуються методи наноімпринтної літографії. Проведені дослідження показали можливість наноструктурування поверхонь халькогенідних плівок цим методом. Були виготовлені нановідбитки з мікро- та нанорозмірними рельєфними елементами. Цей процес дозволяє легко та економічно ефективно виготовляти наноструктури на халькогенідній плівці для застосування в оптичних і фотонних пристроях [11,12]. Принципово нові можливості для створення плоскої оптики можуть бути досягнуті при використанні метаматеріалів, шари яких формуються методами лазерної літографії.

2. ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПЛІВКАХ НЕОРГАНІЧНИХ ФОТОРЕЗИСТІВ НА ОСНОВІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Вибір товщини шару фоторезисту залежить від конфігурації дифракційних оптичних елементів, які планується створити, та подальшого процесу обробки підкладок. Типові значення товщини шару фоторезисту становлять від сотні нанометрів до кількох мікрометрів. Залежно від режиму опромінення фоторезисту створюється необхідний профіль на його поверхні (бінарний чи напівтоновий). Рельєфні структури на фоторезисті, отримані після селективного травлення, можуть використовуватися безпосередньо як дифракційні оптичні елементи. Однак дифракційні оптичні елементи можна виготовляти не лише з полімерних матеріалів (матеріал фоторезисту), а із будь-якого матеріалу підкладки, на яку нанесено фоторезист (наприклад, кремній, сапфір, скло тощо).

Халькогенідні склоподібні напівпровідники можуть ефективно використовуватися для виготовлення методом прямого лазерного запису мікрорельєфних одно-, дво- і тривимірних

періодичних структур та фотонних нанокристалів [1-8]. Вони мають якісно нові і цікаві оптичні, нелінійно-оптичні і квантово-оптичні властивості [6]. Керування топологією халькогенідних плівок можна розглядати як ключовий аспект для створення оптичних елементів, таких як решітки, метаповерхні, хвилеводи та інші різноманітні заломлюючі та дифракційні оптичні компоненти [9]. Роздільна здатність халькогенідних склоподібних напівпровідників забезпечує запис ліній з високою щільністю (понад 5000 лін./мм), необхідну для отримання високоапертурних дифракційних оптичних елементів [1,2,8]. Мікрорельєфні зображення на халькогенідних напівпровідниках можна отримати різними методами прямого лазерного запису, локальним випаровуванням поглинаючого матеріалу, зміною об'єму матеріалу в зоні випромінювання та фотоструктурними перетвореннями з подальшим селективним хімічним травленням. Детальний аналіз методів прямого лазерного запису на халькогенідних напівпровідниках представлено у роботі [2]. У методі ПЛЗ широко використовуються неорганічні фоторезисти на основі халькогенідних напівпровідників [5,8-10]. Процеси селективного хімічного травлення опромінених фоточутливих халькогенідних аморфних плівок, які можуть бути використані в якості фоторезистів у літографії, досліджуються з початку 1970-х років. Процес селективного розчинення халькогенідних плівок є важливим етапом створення мікрорельєфних структур [4,8]. Мікрорельєфні зображення на халькогенідних напівпровідникових плівках можуть формуватися під дією лазерних імпульсів різної тривалості. Фотоструктурні перетворення в халькогенідних напівпровідниках дозволяють створювати багаторівневі мікрорельєфні зображення. Використання неорганічних фоторезистів може полегшити деякі проблеми переходу до нанорозмірного діапазону.

3. СТВОРЕННЯ МІКРОРЕЛЬЄФНИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕОРГАНІЧНИХ ФОТОРЕЗИСТІВ

Властивості неорганічних резистів на основі халькогенідних склоподібних напівпровідників дозволяють використовувати їх як для запису напівтонових зображень, так і бінарних структур [7,8,13-16]. Особливу увагу привертає можливість запису на ХСН тривимірних періодичних структур [17]. Істотною перевагою неорганічних резистів на основі ХСН перед органічними резистами є можливість формування складних оптичних структур з нанорозмірними елементами за один етап травлення [15,18]. Ще однією перевагою використання неорганічних фоторезистів на основі халькогенідних напівпровідників є можливість створення виступів у зоні лазерного запису (на негативному резисті) або ямок (на позитивному резисті) різної висоти (глибини). Неорганічні резисти характеризуються широким динамічним діапазоном [15,18]. Типова експозиційна характеристика неорганічного резисту показана на рис.1 [15].

Товщина шару фоторезисту залежить від необхідної структури дифракційного оптичного елемента і подальшого процесу обробки. Типові значення становлять від декількох сотень нанометрів до декількох мікрометрів. Показано, що рельєфні структури на шарі неорганічного резисту мають досить високу механічну міцність, що дозволяє утворювати дифракційні мікрооптичні елементи безпосередньо в шарі резисту без додаткової обробки матеріалу підкладки [19]. Роздільна здатність неорганічних фоторезистів на основі халькогенідних напівпровідників дозволяє записувати доріжки шириною 0,3—0,5 мкм. Мінімальна ширина доріжки, записана лазерним променем на плівках неорганічного резисту, в першу чергу, визначається роздільною здатністю оптичної системи, яка фокусує випромінювання лазерного запису [8,20]. Зображення доріжок, записаних на позитивних і негативних неорганічних резистах, показано на рис.2 і рис.3 відповідно.

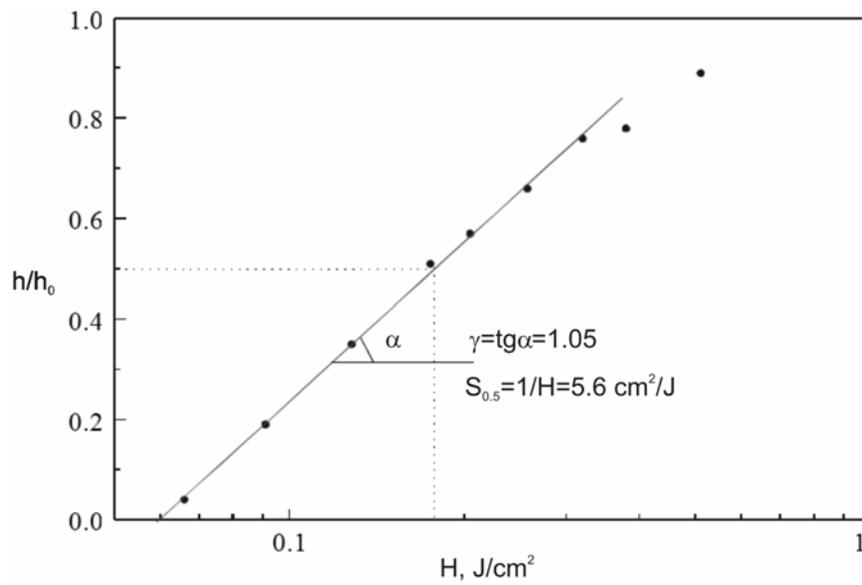


Рис.1. Експозиційна характеристика неорганічного негативного резисту As_2S_3 [15].

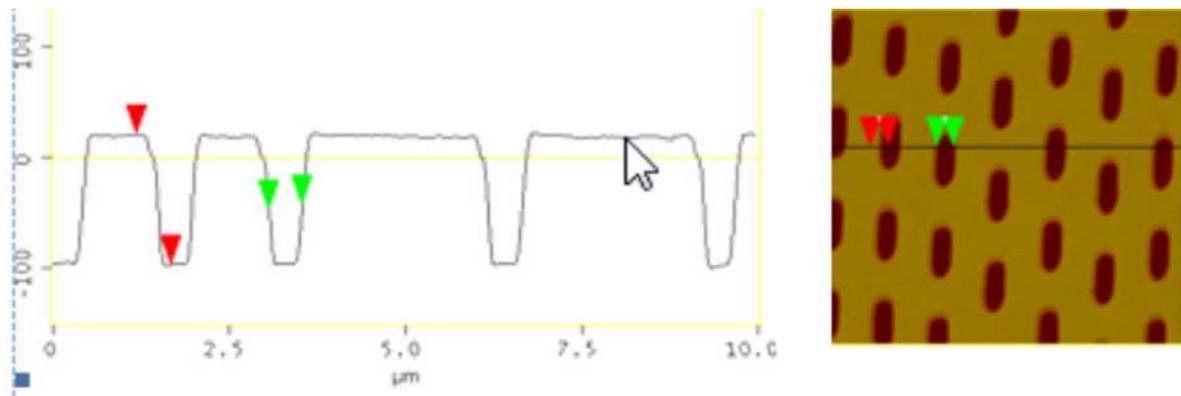


Рис.2. Рельєфна мікроструктура на позитивному неорганічному фоторезисті GeSe_2 [21].

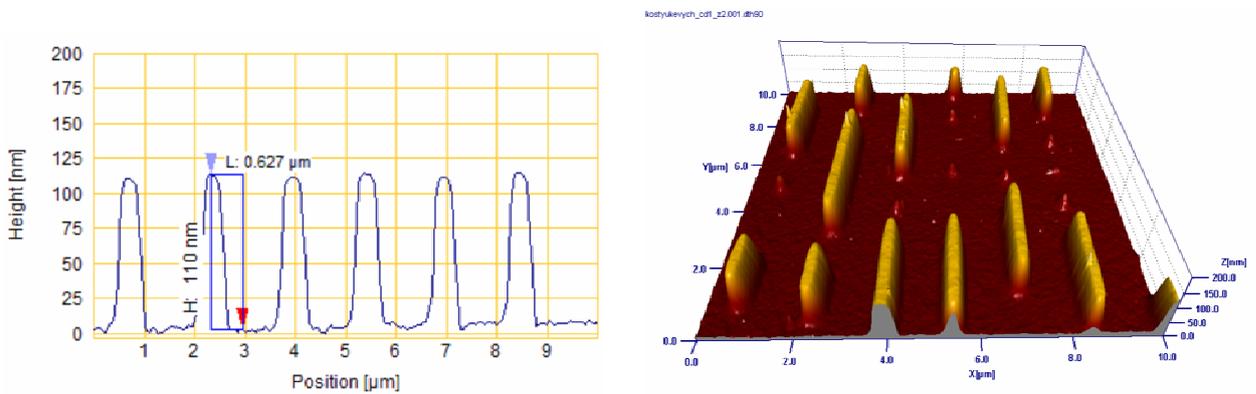


Рис.3. Рельєфна мікроструктура на негативному неорганічному резисті As_2S_3 [22].

Залежно від режиму опромінення фоторезисту на його поверхні створюється необхідний профіль. Отриманий профіль на фоторезисті може використовуватися безпосередньо в якості дифракційного елемента. При цьому переваги резистів на основі халькогенідних плівок над іншими типами резистів обумовлені високими показниками заломлення, широким діапазоном прозорості та більшою механічною міцністю. Додатковими перевагами таких неорганічних фоторезистів є можливість використання їх як у позитивному, так і в негативному режимах, більш широким динамічним діапазоном процесу запису [15,16,18]. Тонкоплівкові фоторезисти на базі халькогенідного скла знаходять застосування у напівтоновій літографії. Показано, що плівки халькогенідного скла можуть бути використані для створення ультратонких (~ 600 нм) зображень у відтінках сірого з високою роздільною здатністю. Це створює можливість виготовлення ультратонких лінз Френеля, прозорих у видимій та ІЧ-областях спектра[23].

4. ПРЯМИЙ ЛАЗЕРНИЙ ЗАПИС МІКРОРЕЛЬЄФНИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Перспективним напрямком досліджень є створення мікро- та наноструктур на поверхні халькогенідної плівки для оптичних застосувань без використання процесу селективного хімічного травлення. Пряме нанесення мікро- та наноструктур на поверхні халькогенідних плівок лазерним або електронним променем без хімічного травлення викликає великий інтерес завдяки таким перевагам, як висока гнучкість процесу виготовлення і точність, помірна вартість і висока швидкість [16,24]. Зображення дифракційних решіток, отриманих прямим (оптичним) методом за рахунок фотоіндукованого масопереносу речовини плівки халькогенідного напівпровідника, показані на рис. 4-6 [25, 26].

Дифракційні решітки можуть бути створені на поверхні плівок халькогенідного скла в широкій області температур, від 4 К (рис. 5 а) до температури розм'якшення вихідного скла (рис.5 б, 6 а, б), причому підвищення температури запису значно прискорює процес формування рельєфу [26]. Аналогічний результат (прискорення запису) може бути досягнутий шляхом опромінення зони запису додатковим лазером, який має поляризацію, ортогональну до поляризації променів запису.

Теоретичний аналіз кінетики фотоіндукованого масопереносу показує, що зміна профілю аморфних плівок халькогеніду $As_{20}Se_{80}$ відбувається за рахунок об'ємної дифузії атомів As і Se в результаті конкуренції між капілярними силами та електростатичними силами, створеними перерозподілом електронів і дірок, утворених світлом [27].

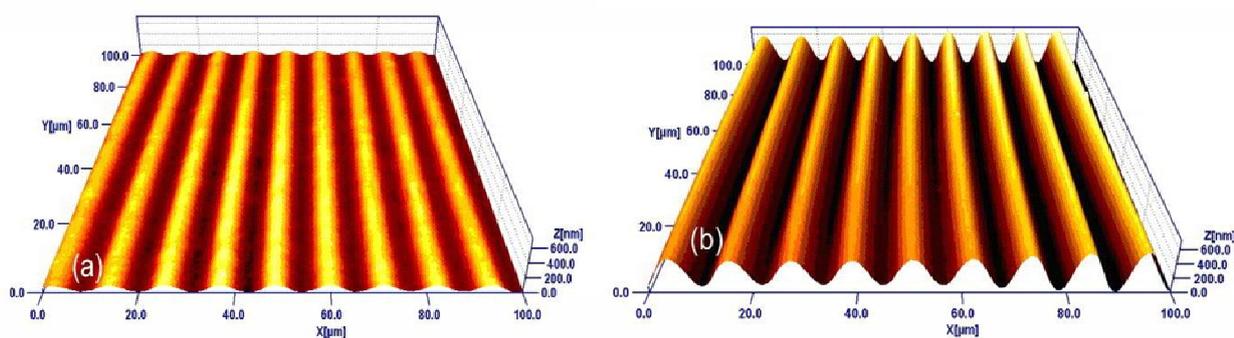


Рис.4. АСМ-зображення дифракційних решіток, записаних при температурах 77 К (а) і 300 К (б) на тонких плівках $As_{20}Se_{80}$ [25].

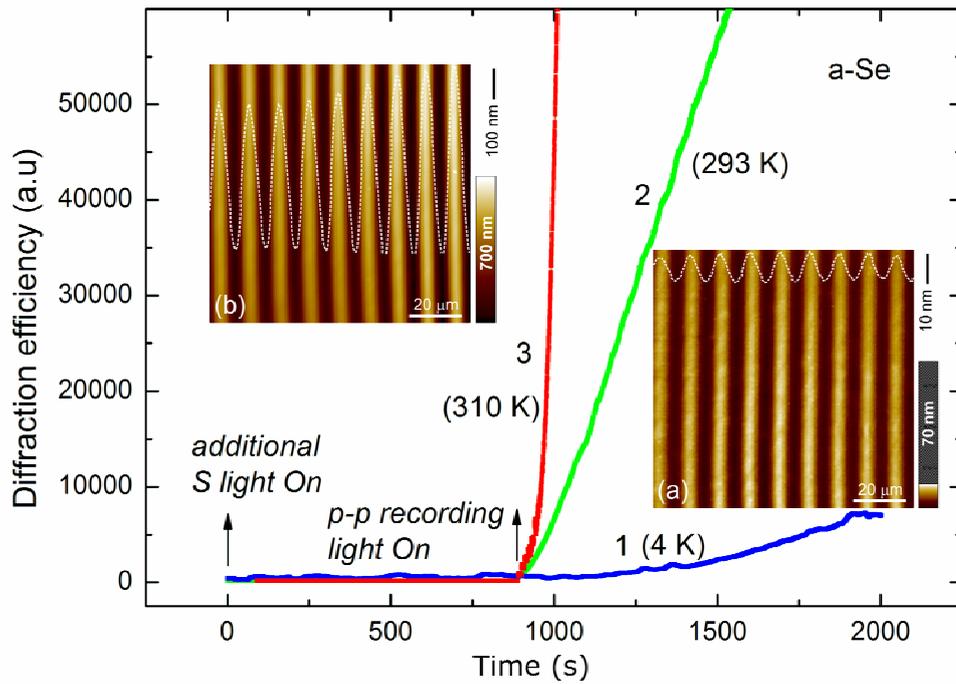


Рис. 5. Кінетика дифракційної ефективності при формуванні дифракційної решітки на поверхні плівки аморфного селену при різних температурах запису (криві 1–3) (температури та поляризації лазерів запису та підсвітки вказані на рисунку). Стрілками показані моменти включення лазерів. На вставках: АСМ-зображення рельєфів, одержаних при 4К (а) та 310К (б). Пунктирні лінії відповідають змінам висоти рельєфів у відповідності до перерізів АСМ-сканів (вертикальні осі подані у нм).

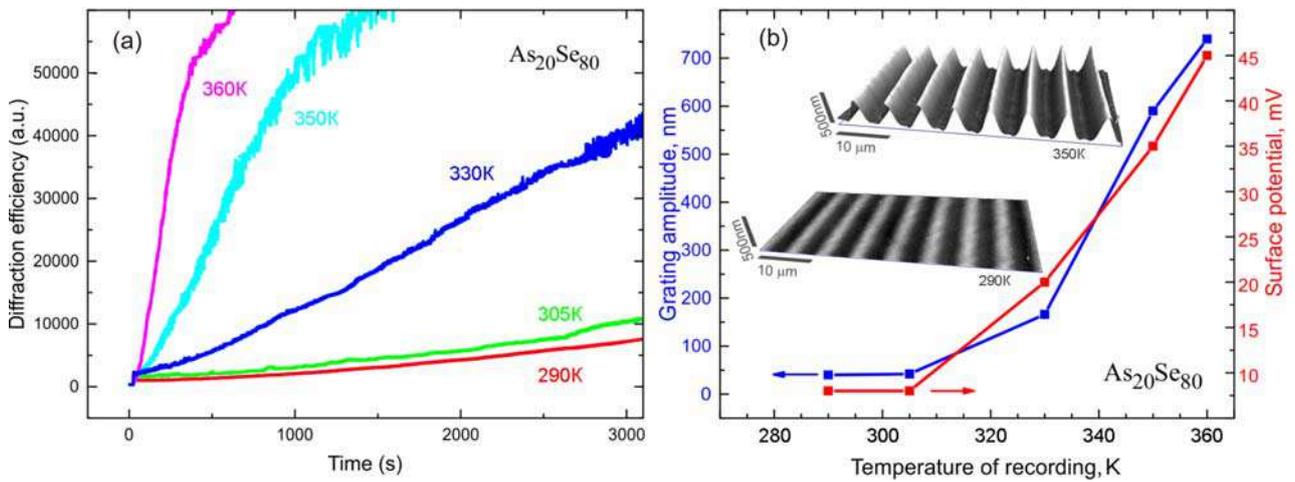


Рис. 6. Кінетика дифракційної ефективності при формуванні дифракційної решітки на поверхні аморфної плівки $As_{20}Se_{80}$ при різних температурах для р-р схеми запису (температури запису вказані на рисунку) (а) та висоти решіток, одержаних при різних температурах запису протягом 15 хвилин при потужності лазера 150 мВ/см^2 і відповідний їм поверхневий потенціал (б). На вставках: АСМ-зображення поверхневих рельєфів для двох температур запису.

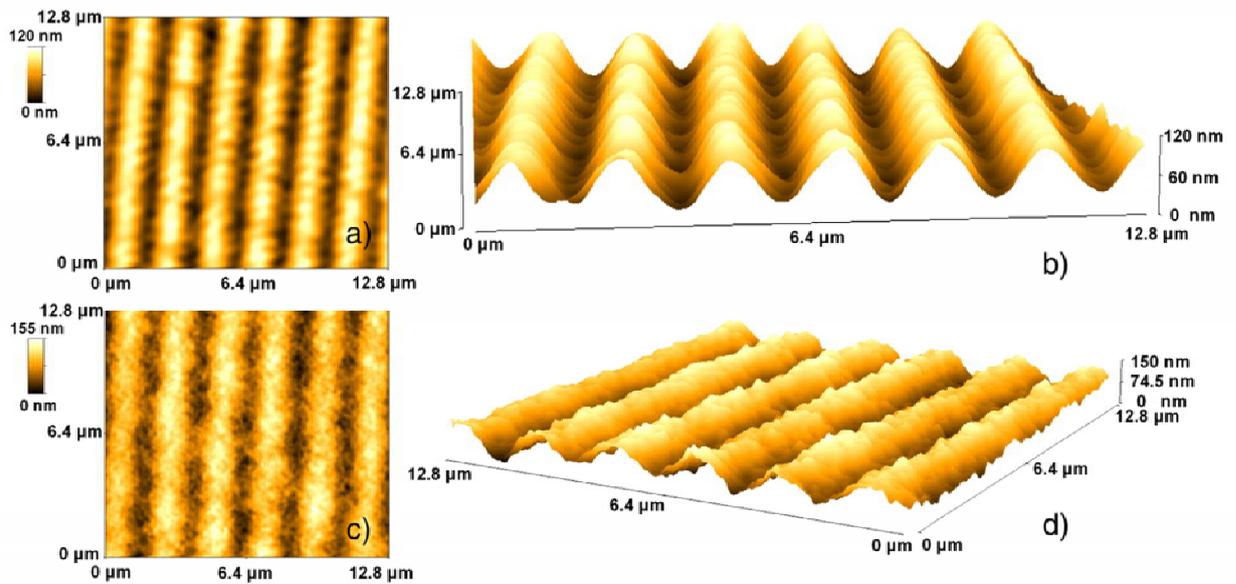


Рис.7. АСМ-зображення поверхневих рельєфів, одержаних методом голографічного запису в номінально чистому шарі халькогенідної плівки $As_{20}Se_{80}$ (a, b), та в цій же плівці, напilenій на золоті наночастинки (c, d) [29].

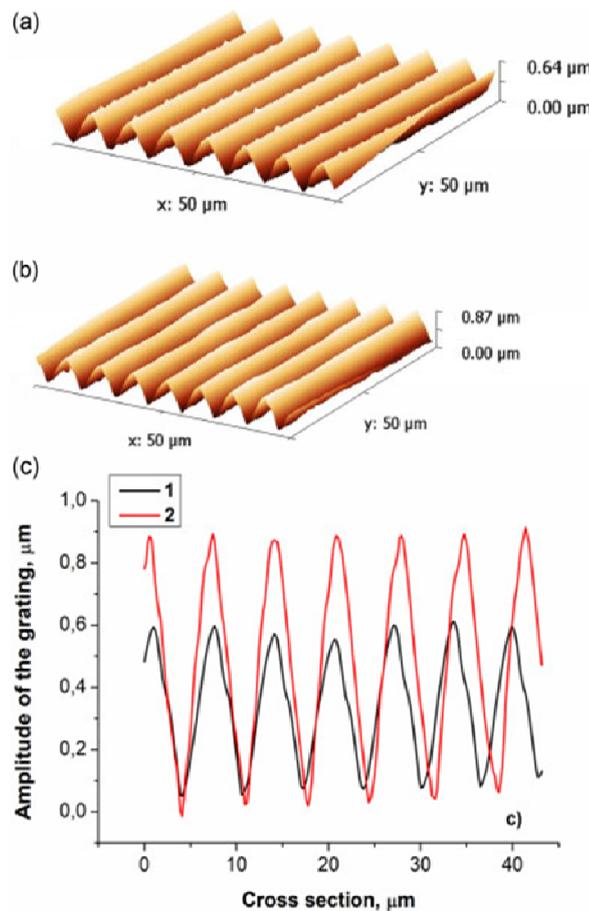


Рис.8. АСМ-зображення голографічної решітки в чистому халькогенідному шарі $Ge_{20}Se_{80}$ (a) і в зразку з шаром НЧ Au (б), а переріз відповідних рельєфів (в): 1 – плівка $Ge_{20}Se_{80}$, 2 – плівка $Ge_{20}Se_{80}$, нанесена на шар з НЧ Au [28].

Застосування шару наночастинок золота (НЧ Au) дозволяє реалізувати більш високий рівень масопереносу і більш ефективну модифікацію поверхні халькогенідної напівпровідникової плівки за рахунок збудження поверхневих плазмонів [28-30].

Швидкість і кінцева величина поверхневого рельєфу повинна бути вищою в структурі з локалізованими плазмонними полями, головним чином, за рахунок того, що останні впливають на процеси генерації заряду і руху атомів, ініційованих підсвічуванням [28]. Одержані результати свідчать на користь цього припущення. Так, поверхневий рельєф був записаний в одних і тих же умовах на поверхні номінально чистої плівки $As_{20}Se_{80}$ та на поверхні такої ж плівки, нанесеної на шар наночастинок золота діаметром біля 120 нм (рис.7, а та б відповідно). Період решіток складав 1500 нм. Було встановлено, що при однакових умовах запису висота рельєфу для плівки, нанесеної на шар наночастинок, в 1.3 рази перевищує висоту рельєфу, одержаного на поверхні номінально чистої плівки $As_{20}Se_{80}$ (81 нм проти 62 нм). Аналогічний результат було одержано для плівки $Ge_{20}Se_{80}$ (рис.8) [31].

Слід відмітити, що поверхневі рельєфні решітки, сформовані в плівках $As_{20}Se_{80}$ фотоіндукованим мас-транспортном, можуть бути стерті рівномірним лазерним променем з області краю поглинання ($\lambda = 660$ нм), а швидкість стирання залежить від інтенсивності лазера, поляризації і періоду решітки. При цьому амплітудна залежність стирання є незвичайною: решітки малих періодів стиралися, а решітки великих періодів, навпаки, збільшувалися по амплітуді [32].

5. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АБЛЯЦІЙНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗАПИСУ МІКРОРЕЛЬЄФНИХ ДИФРАКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Методом прямого абляційного лазерного запису на поверхні плівок халькогенідних напівпровідників можуть створюватися бінарні рельєфні дифракційні оптичні елементи. Метод абляційного лазерного запису широко використовувався в системах лазерного запису і дозволяв отримувати елементи та періодичні структури з шириною ліній 0.6 - 2.0 мкм. Механізми формування поверхневих структур на поверхні халькогенідних плівок є термічно індукованими процесами, викликаними локальним нагріванням, і включають термопластичну деформацію, перенос речовини за рахунок градієнта поверхневого натягу і випаровування [33]. Процес отримання рельєфних структур експериментально досліджувався на плівках халькогенідних напівпровідників різного складу. Слід відзначити результати запису на тонких плівках евтектичного складу $Te_{14}Sb_{10}Se_{61}Ge_{15}$. Мікрорельєфні зображення на плівках цього складу наведені на рис. 9 і 10 [34].

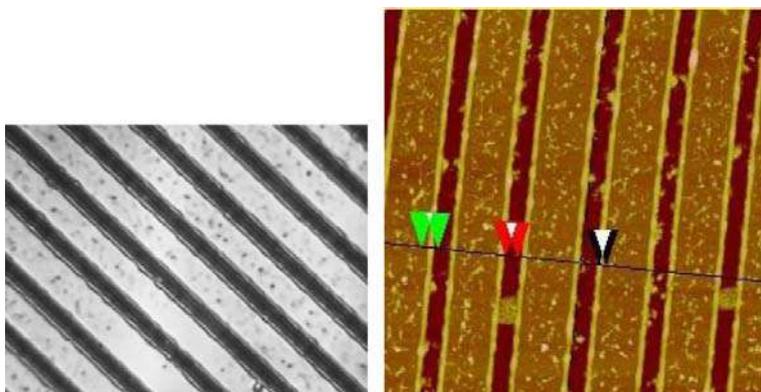


Рис. 9. Мікрорельєфне зображення, отримане методом абляційного запису на тонких плівках евтектичного складу $Te_{14}Sb_{10}Se_{61}Ge_{15}$ [34].

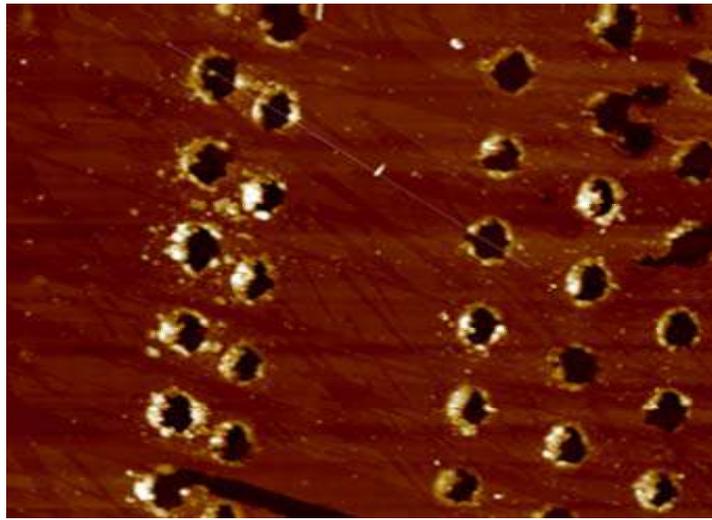


Рис. 10. Зображення мікроотворів, отриманих методом абляційного запису на тонких плівках евтектичного складу $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ (запис зроблено у 1982 році) [34].

Проведені дослідження показали, що тонкі плівки евтектичного складу $\text{Te}_{14}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{61}\text{Ge}_{15}$ зберігають дзеркальне відбиття протягом десятків років. На цих зразках були відсутні зони із зміненими оптичними характеристиками, а зони запису мікрорельєфних структур на оптичному носії досить добре зберігаються.

Можливість виготовлення методом абляційного запису рельєфних дифракційних оптичних елементів була продемонстрована на тонких плівках потрійних систем As-S-Se та Ge-As-S [21]. На поверхні плівок товщиною 1 мкм були сформовані дифракційні решітки з періодом 2,56 мкм та глибиною до 100 нм. Отримані бінарні дифракційні оптичні елементи на поверхні тонких плівок халькогенідних напівпровідників As_2S_3 і $\text{Ge}_{25}\text{As}_{15}\text{S}_{60}$ показані на рис. 11 [33].

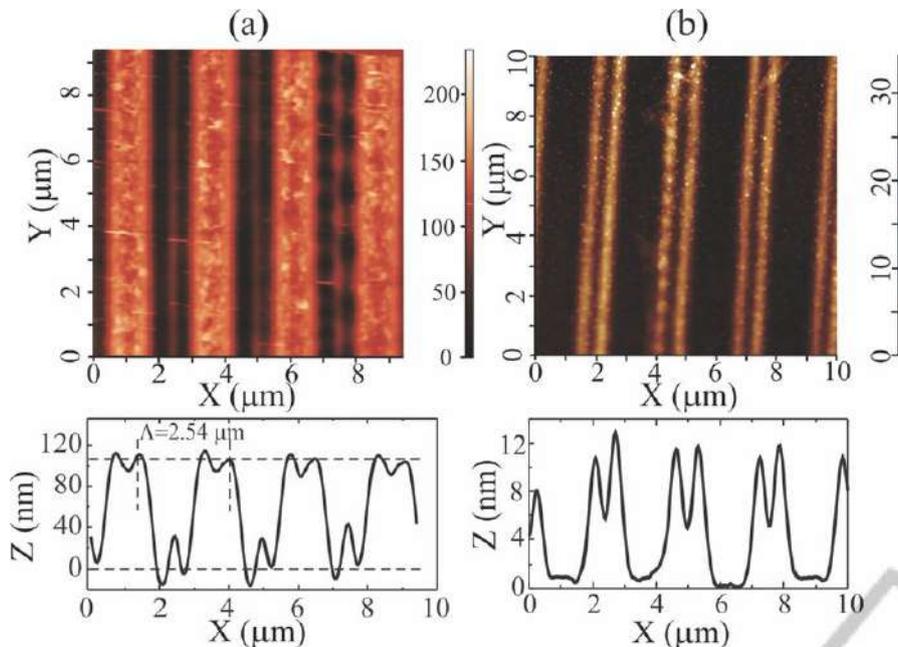


Рис. 11. АСМ- зображення та усереднені профілі рельєфних решіток, сформованих ПЛЗ на поверхні тонких плівок As_2S_3 (а) і $\text{Ge}_{25}\text{As}_{15}\text{S}_{60}$ (б), (інтенсивність запису 5.6×10^5 Вт/см², швидкість сканування 75 мм/сек) [33].

Слід відмітити, що максимальне значення для першого порядку дифракції становило тільки 8%. Для практичного застосування знадобиться процес травлення після експонування, щоб значно збільшити глибину рельєфних структур.

6. ВИСНОВКИ

Зміни фізико-хімічних властивостей халькогенідних напівпровідників під дією лазерного випромінювання (розчинності у травниках, локальне випаровування, зміна об'єму, локальне переміщення матеріалу в зоні опромінення та інші) дозволяють ефективно використовувати ці матеріали для формування дифракційних оптичних елементів різного призначення.

1. Найбільшу роздільну здатність при створенні дифракційних оптичних елементів забезпечує використання фотоструктурних перетворень у тонких плівках халькогенідних напівпровідників під дією лазерного випромінювання.
2. Низькі температуропровідність і температура плавлення дозволяють під дією лазерного випромінювання формувати мікрорельєфні елементи з субмікронними розмірами.

¹A.A. Kryuchyn, ¹V.V. Petrov, ¹V.M. Rubish, ¹M.L. Trunov,
²S.O. Kostyukevych, ²K.V. Kostyukevych

TECHNOLOGIES FOR CREATING SURFACE RELIEFS ON FILMS OF CHALCOGENIDE SEMICONDUCTORS

A review of recent progress in optical recording of surface relief structures in the films of amorphous chalcogenides is presented. Various aspects related to light-driven macroscopic effects for these materials (changes in solubility, local evaporation, volume changes, mass-transport and so on) where stimulated surface patterning takes place due to the interaction of matter with light are discussed. Examples of the creation of relief microstructures in one stage of selective digestion using negative and positive photoresists based on chalcogenide semiconductors are given. It is shown that a promising method for creating surface reliefs of different dimensions is the direct (optical) method due to the photoinduced mass transfer of the substance of the chalcogenide film. At the same time, diffraction lattices, for example, can be created on the surface of the film in a wide temperature range (from 4K to the softening temperatures of the material), and an increase in the recording temperature significantly speeds up the process of relief formation. Technologies of direct ablation laser recording of microrelief diffraction elements on films of chalcogenide semiconductors are analyzed.

Keywords: surface relief, chalcogenide semiconductors, chemical etching, direct laser recording.

1. F. Capasso. The future and promise of flat optics: a personal perspective. *Nanophotonics*. 2018. 7, №6. P.953-957.
2. She Alan, Zhang Shuyan, Shian Samuel, R.David. Clarke and Federico Capasso. Large area metalenses: design, characterization, and mass manufacturing. *Opt. Express*. 2018. 26. P.1573-1585.
3. Michael T. Gale, Markus Rossi, Joern Pedersen and Helmut Schuetz. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists. *Optical Engineering*. 1994. 33, №11). <https://doi.org/10.1117/12.17982>.
4. M. Rossi, R. E. Kunz, & Herzig, H. P. Refractive and diffractive properties of planar micro-optical elements. *Applied Optics*. 1995. 34, №26. 5996. doi:10.1364/ao.34.005996.

5. N. Mohammad, M. Meem, B. Shen, et al. Broadband imaging with one planar diffractive lens. *Sci Rep.*2018. **8**. 2799. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21169-4>.
6. A. Braun and S. A. Maier. Versatile direct laser writing lithography technique for surface enhanced infrared spectroscopy sensors. *ACS Sens.*2016.**1**,№9. P. 1155–1162.
7. S. Schroeter, M. Vlček, R. Poehlmann, and A. Fišerová. Efficient diffractive optical elements in chalcogenide glass layers fabricated by direct DUV laser writing. *J. Phys. Chem. Solids.*2007. **68**,№5-6.P. 916–919.
8. V. V. Petrov, A. A. Kryuchyn, S. O. Kostyukevych, V. M. Rubish. Direct laser writing of microrelief structures on chalcogenide glass by laser beam recorder of master discs.*Data Recording, Storage & Processing.* 2020. **22**,№1.P.3-11.
9. A.A.Kryuchyn, V.V.Petrov, V.M.Rubish, S.A. Kostyukevych. The direct laser writing micro relief structures on chalcogenide glass by laser beam recorder of master discs. AbstractBook, 9thInternational Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides Chisinau, Republic of Moldova, June 30 – July 4, 2019. P. 8-9.
10. S.Banerji, M.Meem, A.Majumder, F.G.Vasquez, B.Sensale-Rodriguez, R.Menon. Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses.*Optica.* 2019. **6**,№6. P.805-810;<https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.000805>.
11. Sivan Tzadka Shalit, Natali Ostrovsky, Hadar Frankenstein Shefa, Evyatar Kassis, Shay Joseph, Mark Schwartzman. Direct nanoimprint of chalcogenide glasses with optical functionalities via solvent-based surface softening. *Optics Express.* 2020.**30**, №15. P.26229-?
12. Dor Yehuda, Eviatar Kassis, Shay Joseph, and Mark Schwartzman.Direct soft imprint of chalcogenide glasses.*Vacuum Sci. & Technology.* 2018. **36**. 031602; <https://doi.org/10.1116/1.5023173>.
13. Y.Isbi, S.Sternklar, E.Granot, V.Lyubin, M.Klebanov, A.Lewis. Sub-wavelength optical recording on chalcogenide glassy film. *Optics Communications.*1999.**171**,№4/6.P.219-223; [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00541-64](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00541-64).
14. Y.Zha, M.Waldmann, & C. B.Arnold. A review on solution processing of chalcogenide glasses for optical components.*Optical Materials Express.*2013.**3**, №9.1259. doi:10.1364/ome.3.001259
15. S. Kostyukevych, P. Shepeliavyi, S. Svechnikov. N.L. Moskalenko, V.M.Tomchuk, A.A. Koptuyh, A.V. Volkov, N.L.Kazansky, G.F. Kostyuk. Formation of diffractive optical elements using inorganic laser lithography. *Data Recording, Storage and Processing.*2002. **4**,№3. P. 3-12.
16. E. Achimova. Direct surface relief formation in nanomultilayers based on chalcogenide glasses: A review. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.*2016 **52**, №5. P. 456-468. 10.3103/S1068375516050021.
17. S.Wong, M. Deubel, F.Perez-Willard, S.John, G.A.Ozin, M.Wegener, G. von Freymann Direct Laser Writing of Three-Dimensional Photonic Crystals with a Complete Photonic Bandgap in Chalcogenide Glasses. *Adv.Mater.*2006. **18**. 265. doi: 10.1002/adma.200501973
18. V.Petrov, A.Kryuchin, S.Kostyukevych, V.Rubish. Inorganic Photolithography. Institute for Physics of Metals, NAS of Ukraine, Kyiv. 2007. 195 p.
19. S.Kostyukevych, P.Shepeliavyi, R.Moskalenko, V.Wenger, V.Petrov, A.Kryuchyn, S. Shanoilo. The study of the mastering of compact discs on inorganic photoresists. *Data Recording, Storage and Processing.*2001.**3**, №4. P.5-14.
20. A. Kryuchyn, V. Petrov, V. Rubish, M. Trunov, P. Lytvyn, S. Kostyukevych.Formation of Nanoscale Structures on Chalcogenide Films.*Physica status solidi (b).*2017.**255**.201700405.DOI: 10.1002/pssb.201700405.
21. I.Indutny, A.Kryuchyn, Yu.Borodin, V.A.Danko, M.V.Lukaniuk, V.I.Minko, P.E.Shepelyavy, E.V.Gera, V.M.Rubish. Optical Recording of Micro- and Nano- Relief Structures on Inorganic Resists Ge-Se. *Data Recording, Storage and Processing.* 2013. **15**, №4. P. 3-14.
22. A.Kryuchyn, V.Petrov, V.Rubish, A.Lapchuk, S.Kostyukevych, P.Shepeliavyi, K.Kostyukevych. High-speed optical recording in vitreous chalcogenide thin films. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* 2014. **17**, №4. P.389–393.
23. A.Kovalskiy.Chalcogenide glass e-beam and photoresists for ultrathin grayscale patterning. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS.* 2009. **8**,№4. 043012. doi:10.1117/1.3273966.
24. A. Stronski. Chalcogenide glasses: advances in research and applications; <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/225731/1/48-49>.
25. V.Takats, M.Trunov, K.Vad, J.Hakl, D.Beke, Y.Kaganovskii, S. Kökényesi. Lov-temperature photo-induced mass transfer in thin As₂₀Se₈₀ amorphous films. *Materials Letters.* 2015. **160**. P.558-561.
26. M.L.Trunov, P.M.Lytvyn. Selective light-induced mass transport in amorphous As_xSe_{100-x} films driven by the composition tuning: Effect of temperature on maximum acceleration. *J.Non-Cryst.Solids.* 2018. **493**. P.86-93.
27. Yu Kaganovskii, M.L Trunov, D.L Beke, S Kökényesi. Mechanism of photo induced mass transfer in amorphous chalcogenide films. *Materials Letters.* 2012. **66**. P.159-161.
28. M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy, A.Csik, V.M. Rubish, S. Kökényesi. Light-induced mass transport in amorphous chalcogenides:Toward surface plasmon-assisted nanolithography and near-field nanoimaging. *Phys. Stat. Solidi(b).*2014. **251**, №7. P.1354-1362; <https://doi.org/10.1002/pssb.201350296>.
29. I.Charnovych, A.Szabo, Attila Lajos Toth, Janos Volk, M.L.Trunov, S.Kökényesi. Plasmon assisted photoinduced surface changes in amorphous chalcogenide layer.*J.Non-Cryst.Solids.* 2013. **377**. P.200-204.

30. В.В.Петров, А.А.Крючин, Ю.А.Куницький, В.М.Рубіш, А.С.Лапчук, С.О.Костюкевич. Методи нанолітографії. Київ: Наукова думка.2015. 262 с.
31. I.Csarnovich, M.Veress, P.Nemes, S.Molnár, & S.Kökényesi. Surface plasmon enhanced light-induced changes in Ge-Se amorphous chalcogenide – gold nanostructures. *J. Non Cryst.Solids*.2021.**553**. P.120491.doi:10.1016/j.jnoncrsol. 2020.120491.
32. M.L. Trunov. Unusual polarization dependent optical erasure of surface relief gratings on amorphous chalcogenide films. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. Щорічна підсумкова наукова конференція, 28-29 вересня 2020 року: збірник / за ред. В.В. Петрова. Київ: ІПРІ НАН України. 2020. 134 с. Reestratsia, Zberigannja ta Obrobka Danych. Kyiv.2020. P.53-54, published by Institute for Information Recording of NASU.
33. I.Voynarovych, R.Poehlmann, S.Schroeter and M.Vlcek. Fabrication of Surface Relief Optical Elements in Ternary Chalcogenide Thin Films by Direct Laser Writing. DOI: 10.5220/0005404001340139. In Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (*PHOTOPTICS-2015*). P. 134-139. ISBN: 978-989-758-093-245.
34. V.V.Petrov, A.A.Kryuchyn, I.V.Gorbov, I.O.Kosko, S.O.Kostyukovich. Analysis of properties of optical carriers after long-term storage. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2009. **12**,№4. P.399-402.

Отримано 17.08.2022.

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
2, вул. М. Шпака,
03113 Київ, Україна
E-mail: kryuchyn@gmail.com, petrov1940@gmail.com,
center.uzh@gmail.com, trunov.m@gmail.com

²Інститут фізики напівпровідників
ім.В.Є. Лашкарьова НАН України,
41,проспект Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: skostyukovich@gmail.com, biosen@isp.kiev.ua